

PENGARUH TINGGI MUKA AIR SALURAN DRAINASE, PUPUK, DAN AMELIORAN TERHADAP EMISI CO₂ PADA PERKEBUNAN KELAPA SAWIT DI LAHAN GAMBUT

Effect Of Drainage Water Level, Fertilizer, and Ameliorant On CO₂ Emission at Oil Palm Plantation on Peatland

AI DARIAH¹⁾, JUBAEDAH¹⁾, WAHYUNTO²⁾, dan JOKO PITONO³⁾

¹⁾ Balai Penelitian Tanah

Jalan Tentara Pelajar No 12A, Cimanggu, Bogor 16111

²⁾ Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian

Jalan Tentara Pelajar No 12A, Cimanggu, Bogor 16111

³⁾ Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan

Jalan Tentara Pelajar No. 1, Cimanggu, Bogor 16111

email: aidariah@yahoo.com

(Diterima Tgl. 10-12-2012 - Disetujui Tgl. 29-4-2013)

ABSTRAK

Drainase yang berlebihan dan penggunaan pupuk yang intensif diduga menjadi penyebab tingginya emisi gas rumah kaca (GRK) pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh tinggi muka air (TMA) saluran drainase, pupuk, serta amelioran terhadap emisi CO₂ dari perkebunan kelapa sawit di lahan gambut. Penelitian dilakukan dari bulan Januari 2010 sampai dengan Desember 2011, pada perkebunan sawit di lahan gambut, di Kecamatan Siak Kecil, Kabupaten Bengkalis, Riau, menggunakan rancangan petak terpisah, tiga ulangan. Petak utama adalah TMA saluran drainase (40, 60, dan 80 cm). Anak petak adalah pupuk dan amelioran: (1) dolomit 3 kg/pohon/tahun; (2) Pugam 10 kg/pohon/tahun; (3) Pupuk dosis rekomendasi (2,5 kg urea+2,75 kg SP-36+2,25 kg KCl+dolomit 2 kg)/pohon/tahun; (4) Pupuk 75% dosis rekomendasi pukan 20 kg/pohon/tahun; (5) Pupuk 75% dosis rekomendasi Pugam 2,5 kg/pohon. Parameter yang diamati adalah fluks CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada TMA drainase 80 cm, perlakuan dolomit menghasilkan fluks CO₂ nyata paling tinggi (142,1 t/ha/tahun) dan terendah (44,5 t/ha/tahun) dicapai perlakuan pugam. Fluks CO₂ yang tinggi (130,6 t/ha/tahun) juga dicapai perlakuan pupuk dosis rekomendasi, khususnya pada TMA 40 cm. Pada musim kemarau TMA drainase berpengaruh nyata terhadap fluks CO₂, terendah dicapai TMA 40 cm. Oleh karena itu, untuk meminimalkan emisi gas CO₂, maka TMA drainase perlu dipertahankan sedangkal mungkin (sekitar 40 cm) selama tidak menurunkan produksi kelapa sawit. Amelioran dengan bahan aktif kation polyvalen berpotensi dapat menekan emisi GRK dari lahan gambut yang dikelola secara intensif.

Kata kunci: amelioran, emisi, drainase, gambut, kelapa sawit, pupuk

ABSTRACT

Excessive drainage and intensive use of fertilizers thought to be the cause of high greenhouse gas emissions in peatland under oil palm plantations. The study aimed at measuring the influence of water level drainage (WLD), fertilizer, and ameliorant on CO₂ emissions from oil palm plantations on peatland. The study was conducted from January 2010 to December 2011, at oil palm plantation on peatland, located in Siak Kecil District, Bengkalis Regency, Riau, using split plot design, with three replications. The main plot were WLD (40, 60, and 80 cm), as sub plots

were fertilizer and amelioran: (1) dolomite 3 kg/tree/year; (2) peat fertilizer 10 kg/tree/year; (3) dose of fertilizer recommendations (2,5 kg urea+2,75 kg SP-36+2,25 kg KCl+dolomite 2 kg)/tree/year; (4) 75% dose of fertilizer recommendations + manure 20 kg/tree/year; (5) 75% dose of fertilizer recommendations + peat fertilizer 2.5 kg/tree/year. Parameter observed was CO₂ flux. The result showed that at WLD 80 cm, dolomite treatment resulted the highest (142,1 t/ha/year) and the lowest CO₂ flux (44,5 t/ha/year) resulted by peat fertilizer. The highest CO₂ flux also reached by fertilizer recommendations treatment, particularly on WLD 40 cm. In dry season WLD significantly effect on CO₂ flux. The lowest reached by WLD 40 cm. Based on that the WLD needs to be maintained in a state of shallow (approximately 40 cm), without lowering production. The use of fertilizer containing ameliorant with the polyvalen cation as active material, potentially suppress the rate of greenhouse gas emissions from peatlands are managed intensively.

Key words: ameliorant, emission, drainage, peatland, oil palm, , fertilizer

PENDAHULUAN

Perluasan areal kelapa sawit di Sumatera, Kalimantan, dan Papua berlangsung sangat pesat (rata-rata sekitar 13% per tahun), yaitu dari 1,34 juta ha pada tahun 1990 menjadi 7,72 juta ha pada tahun 2010. Sekitar 20-22% dari total luas areal kelapa sawit terdapat pada lahan gambut (WRI dalam AGUS, 2012; AGUS *et al.*, 2012). Hal ini telah menimbulkan kekhawatiran dari segi kelestarian lingkungan, yaitu meningkatnya emisi gas rumah kaca. Emisi CO₂ dari lahan gambut berasal dari hilangnya (teroksidasinya) simpanan karbon dari biomas tanaman dan potensi yang lebih besar berasal dari cadangan karbon dalam tanah gambut. AGUS dan SUBIKSA (2008) menyatakan bahwa setiap satu meter ketebalan gambut menyimpan 300-700 ton karbon/ha. JAENICKE *et al.* (2008) memperkirakan total karbon yang tersimpan pada lahan gambut di Indonesia sekitar 55 gigaton.

Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap emisi gas rumah kaca lahan gambut adalah kedalaman muka air tanah, suhu, kandungan mineral dan kation, pH, serta salinitas (BALDOCH dan SKJEMSTAD, 2000; BERGLUND dan BERGLUND, 2011; BERTRAND *et al.*, 2007; BLODAU dan MOORE, 2002; FREEMAN *et al.*, 2000; MINKKINEN *et al.*, 2007; PARMENTIER *et al.*, 2009; HOOIJER *et al.*, 2010).

Kedalaman muka air tanah di lahan gambut dipengaruhi oleh tinggi muka air (TMA) di saluran drainase (NUGROHO *et al.*, 1997). Emisi dari tanah gambut dapat ditekan jika gambut dalam kondisi jenuh atau kedalaman muka air tanahnya sedikit berfluktuasi dekat permukaan (CHIMNER dan COOPER, 2003; DIRKS *et al.*, 2000). Beberapa hasil penelitian menunjukkan korelasi positif antara kedalaman muka air tanah dengan emisi CO₂ (MOORE dan DALVA, 1993; WÖSTEN *et al.*, 2008; HOOIJER *et al.*, 2010). Namun, JAUHIAINEN *et al.* (2008) menyatakan bahwa hubungan antara kedalaman drainase dengan laju emisi tidak selalu linear. Kedalaman muka air tanah yang optimum untuk tanaman kelapa sawit di lahan gambut berdrainase berkisar 60-85 cm (PAGE *et al.*, 2011). Namun, hasil observasi di lapangan banyak ditemukan kedalaman muka air tanah pada perkebunan sawit lebih dari 85 cm.

Pemupukan juga dapat memicu terjadinya emisi gas CO₂, CH₄, dan N₂O. Inilah sebabnya, sektor pertanian seringkali dinyatakan sebagai kontributor utama gas rumah kaca. GREEN *et al.* (1995) menyatakan bahwa pemupukan dapat meningkatkan dekomposisi residu tanaman dan karbon tanah (*microbial respiration*). Pengaruh pemupukan terhadap emisi gas rumah kaca dilaporkan bervariasi (AMADOR dan JONES, 1993; BRIDGHAM *et al.*, 1998; FRANKLIN *et al.*, 2003; MINKKINEN *et al.*, 2007; OLSEN *et al.*, 2005; SILVOLA *et al.*, 1985; SILVOLA *et al.*, 1996).

Faktor lain yang berpengaruh terhadap besarnya emisi gas rumah kaca dari tanah gambut adalah amelioran. Amelioran diperlukan untuk mengatasi kendala reaksi tanah yang sangat masam dan menetralkan asam organik monomer yang bersifat racun. Kapur, tanah mineral, pupuk kandang, dan abu sisa pembakaran dapat digunakan sebagai bahan amelioran tanah gambut, khususnya untuk meningkatkan pH dan basa-basa tanah, serta menanggulangi asam organik beracun (SUBIKSA *et al.*, 1998; SALAMPAK 1999; MARIO, 2002). Kemasaman tanah pada tanah gambut cukup diperbaiki sampai pH 5 karena gambut tidak mempunyai masalah yang berhubungan dengan kadar Al pada taraf yang meracuni tanaman. Peningkatan pH yang terlalu tinggi bisa berdampak terhadap percepatan dekomposisi gambut. Hasil penelitian SUBIKSA (2012) menunjukkan formula amelioran dan pupuk gambut (pugam) sebanyak 750 kg/ha yang mengandung kation polyvalen dengan konsentrasi tinggi terbukti efektif meningkatkan produktivitas tanaman kedelai pada skala rumah kaca. Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh TMA saluran drainase, pupuk, dan amelioran terhadap tingkat emisi CO₂ pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan pada perkebunan sawit rakyat di lahan gambut, terletak di Kecamatan Siak Kecil, Kabupaten Bengkalis, Riau. Umur tanaman sawit berkisar antara 7-8 tahun. Ketebalan gambut di lokasi penelitian berkisar 70-215 cm, dengan tipe substratum tanah adalah liat. Lapisan permukaan (*top soil*) tanah gambut mempunyai tingkat kematangan saprik, sedangkan pada lapisan bawah permukaan (*sub-soil*), tingkat kematangan gambut umumnya adalah hemik. Kemasaman tanah gambut pada kedalaman 0-20 cm rata-rata tergolong sangat masam.

Areal penelitian kelapa sawit seluas ± 12 ha dibagi menjadi tiga dengan luas masing-masing sekitar 4 ha berdasarkan TMA di saluran drainase. Pengaturan TMA di saluran dilakukan pada awal penelitian, yaitu sekitar bulan Januari 2010. Pengaturan TMA di saluran drainase dilakukan dengan menggunakan pintu air yang diletakkan pada masing-masing saluran drainase yang telah ditentukan.

Rancangan percobaan adalah petak terpisah diulang tiga kali. Plot utama (*main plot*) adalah TMA saluran drainase, yaitu 40, 60, dan 80 cm. Perlakuan amelioran dan pupuk merupakan anak plot (*sub plot*), terdiri atas (1) amelioran dolomit 3 kg/pohon/tahun; (2) pugam 10 kg/pohon/tahun; (3) pupuk dosis rekomendasi (urea 2,5 kg/pohon/tahun; SP-36 2,75 kg/pohon/tahun, KCl 2,25 kg/pohon/tahun + dolomit 2 kg/pohon/tahun); (4) pupuk 75% dosis rekomendasi + pupuk kandang 20 kg/pohon/tahun; (5) pupuk 75% dosis rekomendasi + Pugam 2,5 kg/pohon/tahun.

Pugam merupakan pupuk yang juga dapat berfungsi sebagai bahan amelioran. Sebagai pupuk, pugam mengandung fosfat, kalsium, magnesium, dan silika. Sementara itu, sebagai amelioran, pugam mengandung bahan aktif kation polyvalen yang dapat berfungsi sebagai agen pengikat senyawa organik beracun sehingga tidak mengganggu pertumbuhan tanaman. Kandungan kation polyvalen dalam pugam juga diharapkan dapat menekan emisi gas rumah kaca. Perlakuan dolomit 3 kg/pohon/tahun merupakan tingkat pemupukan yang umum diaplikasikan petani di lokasi penelitian.

Aplikasi pupuk dan amelioran dilakukan dua kali setahun. Pada tahun 2010, pemupukan dan ameliorasi dilakukan pada tanggal 24 Januari 2010 dan 24 April 2010, sedangkan pada tahun 2011 dilakukan pada tanggal 24 Juli 2011 dan 24 Oktober 2011. Jumlah pohon yang diberi perlakuan pada setiap plot adalah 25 pohon.

Paramater utama yang diamati adalah fluks CO₂ dari masing-masing plot perlakuan, yang diukur tiga kali. Pengukuran fluks CO₂ yang pertama dan kedua dilakukan bertepatan dengan musim hujan yaitu pada tanggal 13 dan 14 April 2010 (sekitar 5,5 bulan setelah pemupukan kedua 2010), sedangkan pengukuran ketiga dilakukan bertepatan dengan musim kemarau yaitu pada tanggal 29 Juli 2011 (lima hari setelah pemupukan pertama 2011). Pengukuran fluks CO₂ dilakukan pada setiap plot perlakuan (45 plot

perlakuan). Titik pengukuran diletakkan pada piringan tanaman kelapa sawit yang berjarak sekitar 1,5-2,0 m dari pohon kelapa sawit. Gas yang keluar dari permukaan tanah gambut ditampung dalam sungkup tertutup yang terbuat dari paralon berukuran diameter 25 cm dan tinggi 23 cm. Sungkup ditanamkan ke dalam tanah sedalam kurang lebih 5 cm. Gas dari sungkup dialirkan dengan menggunakan pompa tekan kedalam alat pengukur IRGA (*Infra Red CO₂ Gas Analyzer*) model Li-COR 820. Konsentrasi gas langsung dapat direkam setiap interval 1 detik, jangka waktu pengukuran untuk setiap plot sekitar 2,5 menit, sehingga akan didapat sekitar 120-150 titik pengamatan pada setiap kali pengukuran. Suhu dalam sungkup diukur dengan menggunakan termometer.

Hubungan linier antara waktu pengukuran dan konsentrasi CO₂ digunakan untuk menghitung fluks CO₂ menurut MADSEN *et al.*, (2009):

$$f_c = \frac{Ph}{RT} \frac{dC}{dt}$$

Dimana : f_c = fluks CO₂ (μmol/m²/detik)
 P = tekanan atmosfer berdasarkan data yang terbaca pada IRGA (kPa)
 h = ketinggian chamber (cm)
 R = konstanta gas (8,314 Pa m³/°K/mole)
 T = temperatur
 dC/dt = perubahan konsentrasi CO₂ dengan berjalannya waktu, sama dengan kemiringan/*slope* dari persamaan linear hubungan antara konsentrasi gas CO₂ dan waktu.

Tabel 1. Pengaruh perlakuan pupuk dan amelioran pada berbagai TMA drainase terhadap fluks CO₂ (t/ha/tahun) pada perkebunan sawit di lahan gambut
 Table 1. *Effect of fertilizer and ameliorant treatment with different drainage water level on CO₂ flux (t/ha/year) at oil palm plantation on peatland*

Pupuk dan Amelioran <i>fertilizer and ameliorant</i>	Tinggi muka air di saluran drainase <i>water level drainage (cm)</i>		
	40	60	80
Dolomit 3 kg/pohon/tahun / <i>Dolomit 3 kg/tree/year</i>	56,26b B*	84,40a A	142,0a A
Pugam 10 kg/pohon/tahun / <i>Peat fertilizer 10 kg/tree/year</i>	52,62b A	67,62a A	44,54b A
Dosis pupuk rekomendasi / <i>Recommen</i>	130,62a A	57,31a A	69,10ab A
75% dosis pupuk rekomendasi+20 kg pukan/pohon/tahun	66,72b A	85,54a A	68,31ab A
75% dosis rekomendasi+Pugam 2,5 kg/pohon/tahun	60,36b A	82,26a A	70,63ab A

* Huruf kecil yang sama pada kolom yang sama dan huruf besar yang sama pada baris yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan uji DMRT pada taraf nyata 5%

* *The same small letters in the same column and the same capital letters in the same row indicates no significant difference by DMRT at 5% significance level*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Interaksi antara perlakuan TMA di saluran drainase dengan perlakuan pupuk dan amelioran berpengaruh nyata terhadap fluks CO₂ di lahan gambut pada hasil pengukuran fluks CO₂ yang kedua (Tabel 1). Namun, hasil pengukuran fluks yang pertama dan ketiga menunjukkan interaksi tidak nyata.

Pada kedalaman TMA drainase 40 cm, perlakuan pemupukan dengan dosis rekomendasi penuh nyata menghasilkan fluks CO₂ tertinggi dibanding perlakuan lainnya. Hasil ini didukung oleh beberapa hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan efek pemupukan terhadap peningkatan respirasi tanah (SILVOLA *et al.*, 1985; SILVOLA *et al.*, 1996; GREEN *et al.*, 1995; MINKKINEN *et al.*, 2007). Kesuburan tanah gambut umumnya tergolong rendah (AGUS *et al.*, 2012; HARTATIK *et al.*, 2012). Oleh karena itu, untuk mendapatkan tingkat produksi yang optimal diperlukan pemupukan yang intensif. Dengan menggunakan formula pupuk yang dilengkapi dengan amelioran (yaitu pugam), tingkat emisi dapat ditekan menjadi nyata lebih rendah dibanding perlakuan dosis rekomendasi. Pengurangan dosis pupuk NPK menjadi 75% dari dosis rekomendasi

disertai dengan pemberian amelioran berupa pupuk kandang atau pugam juga menghasilkan emisi CO₂ yang nyata lebih rendah dibanding perlakuan pupuk dosis rekomendasi tanpa penambahan pukan atau pugam (Tabel 1).

Pada TMA drainase 60 cm, perlakuan pupuk dan amelioran tidak menyebabkan perbedaan fluks CO₂. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya faktor lain lebih dominan berpengaruh terhadap bersarnya fluks CO₂. Selanjutnya, pada TMA drainase 80 cm, perlakuan pupuk dan amelioran kembali berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂. Perlakuan pugam nyata menghasilkan fluks CO₂ paling rendah, berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan hanya diberi dolomit (Tabel 1). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan amelioran untuk tanah gambut harus lebih selektif. Pengapuran (termasuk penggunaan dolomit) pada lahan gambut dengan tujuan untuk meningkatkan pH tidak terlalu efektif karena kemasaman gambut bukan disebabkan oleh tingginya kandungan Al (HARTATIK *et al.*, 2012). Selain itu, peningkatan pH yang berlebih bisa menyebabkan terjadinya peningkatan dekomposisi gambut (SUBIKSA *et al.*, 2012), yang berdampak terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca.

Pada musim kemarau, TMA di saluran drainase berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂. Hal ini didasarkan pada hasil pengukuran fluks CO₂ ketiga, yang dilakukan bertepatan dengan musim kemarau (29 Juli 2011). Rata-rata fluks CO₂ terendah dicapai perlakuan TMA 40 cm, sedangkan rata-rata fluks CO₂ tertinggi pada penelitian ini dicapai perlakuan TMA 60 cm. Pada TMA drainase 80 cm, besarnya fluks CO₂ kembali menurun, menjadi tidak berbeda nyata dengan TMA drainase 40 cm (Tabel 2). Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian JAUHIAINEN *et al.* (2008), yang menunjukkan bahwa hubungan antara kedalaman drainase dengan laju emisi tidak selalu linier.

Fluks CO₂ yang bersifat tidak linear bisa disebabkan pada kedalaman muka air tanah dangkal, kondisi tanah di permukaan menjadi terlalu jenuh. Sebaliknya, pada kedalaman air tanah terlalu dalam, tanah di permukaan menjadi terlalu kering. Kedua kondisi ini tidak ideal untuk

aktivitas mikroba. Artinya, pada kondisi ini proses dekomposisi terhambat dan dapat berdampak pada penurunan emisi. Meskipun tingkat emisi pada muka air tanah yang dalam bisa dihambat, mekanisme ini tidak disarankan sebagai langkah untuk menekan laju emisi CO₂ karena pada kondisi muka air tanah yang dalam kondisi gambut akan terlalu kering sehingga gambut menjadi sangat mudah terbakar dan resiko terjadinya emisi juga tetap besar. Pada kondisi yang terlalu kering, gambut juga bisa mengalami kering tak balik (*irreversible drying*) sehingga tidak mempunyai kemampuan untuk memegang air.

Pada pengukuran musim hujan (13 dan 14 April 2010) TMA di saluran drainase tidak berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂. Hal ini dapat disebabkan karena pada musim hujan kelembapan tanah tidak dominan dipengaruhi oleh TMA di saluran drainase, tetapi juga dipengaruhi oleh curah hujan.

Tabel 2. Pengaruh tinggi muka air (TMA) di saluran drainase terhadap fluks CO₂ pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut
Table 2. Effect of water level of drainage (WLD) channel on CO₂ flux at oil palm plantation on peatland

Perlakuan/Treatment	Flux CO ₂ (ton/ha/tahun)/CO ₂ Flux (ton/ha/year)		
	13 April 2010 Juli 13 rd , 2010	14 April 2010 April 14 rd , 2010	29 Juli 2011 Juli 29 rd , 2011
TMA saluran drainase 40 cm / WLD 40 cm	88,90 a*	73,31 a	118,82 b
TMA saluran drainase 60 cm / WLD 60 cm	104,39 a	75,43 a	158,65 a
TMA saluran drainase 80 cm / WLD 80 cm	87,03 a	78,93 a	128,98 ab

* Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata menurut uji taraf 5%.

* Numbers followed by the same letter in same column are not significantly different at 5% DMRT

KESIMPULAN

Penggunaan pupuk yang mengandung bahan amelioran dengan bahan aktif kation polyvalen seperti pugam berpotensi menekan laju emisi gas rumah kaca dari lahan gambut yang dikelola secara intensif, sedangkan penggunaan dolomit tidak menunjukkan dampak positif terhadap pengurangan emisi CO₂ dari lahan gambut. Berdasarkan hasil penelitian ini, TMA drainase 40 cm dan penggunaan pupuk yang diperkaya amelioran seperti pugam merupakan perlakuan terbaik ditinjau dari aspek pengurangan fluks CO₂.

Pengaturan tinggi muka air dan aplikasi pupuk yang diperkaya dengan amelioran yang mampu menekan emisi gas rumah kaca, memberi harapan dapat dilakukannya pengelolaan gambut yang lebih berwawasan lingkungan. Namun demikian, perlu dikaji lebih lanjut pengaruhnya terhadap produksi tanaman yang diusahakan sehingga dari aspek ekonomi juga lebih menguntungkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Perkebunan yang telah

mendanai penelitian serta kami berterima kasih kepada kepala, staf peneliti, dan teknisi lapangan Balai Pengkajian Teknologi Pertanian (BPTP) Provinsi Riau atas bantuan dan fasilitasnya selama pelaksanaan lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- AGUS, F. dan I.G.M. SUBIKSA. 2008. Lahan Gambut: Potensi Untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Booklet. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Center (ICRAF) Southeast Asia, Bogor. 36 hlm.
- AGUS, F., I.G.M. SUBIKSA, dan WAHYUNTO. 2012. Pengelolaan Lahan Gambut. Dalam: Janudianto (ed). Membangun Kembali Aceh: Belajar dari Hasil Penelitian dan Program Rehabilitasi Aceh Pasca Tsunami World Agroforestry Center. Hlm. 37-58.
- AGUS, F. 2012. Konservasi Tanah dan Karbon untuk Mitigasi Perubahan Iklim Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Pertanian. Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Hidrologi dan Konservasi Tanah. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Kementerian Pertanian. Bogor, 26 September 2012.

- AMADOR, J.A. and R.D. JONES. 1993. Nutrient limitation on microbial respiration in peat soil with different total phosphorus content. *Soil Biology and Biochemistry*. 25:793-801.
- BALDOCH, J.A. and J.O. SKJEMSTAD. 2000. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Org. Geochem*. 31: 697-710.
- BERGLUND, O. and K. BERGLUND. 2011. Influence of water table level and soil properties on emission of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 45: 923-931.
- BERTRAND, I., O. DELFOSED, and B. MARRY. 2007. Carbon and nitrogen mineralization in acidic, limed, and calcareous agriculture soils: apparent and actual effect. *Biochem*. 30: 276-288.
- BRIDGHAM, S.D., K. UPDEGRAFF, and J. PASTOR. 1998. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in Neuklein Wetlands. *Ecology*. 79(5): 1545-1561.
- BLODAU, C. and T.R. MOORE. 2002. Micro-scale CO₂ and CH₄ dynamics in a peat soil during a water fluctuation and sulfate pulse. *Soil Biology and Biochemistry*. 35: 535-547.
- CHIMNER, R.A. and D.J. COOPER. 2003. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry*. 35: 345-351.
- DIRKS, B.O.M., A. HENSEN, and J. GOUDRIAAN. 2000. Effect of drainage on CO₂ exchange patterns in an intensively managed peat pasture. *Clim Res*. 14: 57-63.
- FRANKLIN, O., P. HOOGBERG, A. EKBLED, and G.I. AGREN. 2003. Pine forest floor carbon accumulation in response to NPK addition: Bomb C-14 modeling and respiration studies. *Ecosystem*. 6: 644-658.
- FREEMAN, C., N. OSTLE, and H. KANG. 2001. An enzymic 'latch' on global carbon store-a shortage of oxygen locks up carbon in peatlands by restraining a single enzyme. *Nature*. 409: 149-159.
- GREEN, C.J., A.M. BLACKMER, and R. HORTON. 1995. Nitrogen effects on conservation of carbon during corn residue decomposition in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 59: 453-459.
- HARTATIK, W., I G.M. SUBIKSA, dan A. DARIAH. 2012. Sifat kimia dan fisika lahan gambut. *Dalam: Nuridget* (eds Nurida, Mulyani, dan Agus). Balai Penelitian Tanah. Pengelolaan Lahan Gambut. Berkelanjutan Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. Kementerian Pertanian. Hlm 45-56.
- HOOIJER, A., S. PAGE, J.G. CANADELL, M.J. KWADIJK, H. WOSTEN, and J. JAUHIAINEN. 2010. Current and future CO₂ emission from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences*. 7: 1505-1514.
- JAENICKE, J., J.O. RIELEY, C. MOTT, P. KIMMAN, and F. SIEGART. 2008. Determination of the amount of carbon stored in Indonesia peatlands. *Geoderma*. 147: 151-158.
- JAUHIAINEN, J., S. LIMIN, H. SILVENNOINEN, and H. VASANDER. 2008. Carbon dioxide and methane fluxes in drained tropical peat before and after hydrological restoration. *Ecology*. 89(12): 3503-3514.
- MADSEN, R., L. XU, B. CLAASSEN, and D. McDERMIT. 2009. Surface monitoring method for carbon capture and storage projects. *Energy Procedia*. 1: 2161-2168.
- MARIO, M.D. 2002. Peningkatan Produktivitas dan Stabilitas Tanah Gambut dengan Pemberian Tanah Mineral yang Diperkaya Bahan Berkadar Besi Tinggi. Disertasi Program Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor. 120 hlm.
- MINKKINEN, K., J. LAINE, N.J. SHURPALI, P. MAKIRANTA, J. ALM., and T. PENTILLA. 2007. Heterotrophic soil respiration in forestry-drained peatland. *Boreal Environment Research*. 12: 115-126.
- MOORE, T.R. and M. DALVA. 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *J. Soil Science* 44 (4): 657-664.
- NUGROHO, K., G. GIANINAZZI, dan I P.G.W. ADHI. 1997. Soil hydraulic properties of Indonesia peat. *In: Rieley and Page (Eds.)*. Biodiversity and Sustainability of Tropical Peat and Peatland. Cardigan, UK: Pp. 147-156. Samara Publishing Ltd.
- OLSEN, R., S. LINDEN, R. GIESLER., P. HOGBERG. 2005. Fertilization of boreal forest reduce of both autotrophic and heterotrophic soil respiration. *Glob. Change. Biol*. 11: 1745-1753.
- PAGE, SE. R. MORRISON, C. MALINS, A. HOOIJER, J.O. RIELEY, and J. JAUHIAINEN. 2011. Review of Peat surface greenhouse gas emissions from oil palm plantations in Southeast Asia. White Paper Number 15. Indirect Effects of Biofuel Production Series. International Council on Clean Transportation. p. 77.
- PARMENTIER, F.J.W., M.K. VAN DER MOLEN, R.A.M. JEU, D.M.D. HENDIRIKS, and A.J. DOLMAIN. 2009. CO₂ fluxes and evaporation on peatland in the Netherlands appear not affected by water table fluctuations. *Agriculture and forest Meteorologi*. 149: 1201-1208.
- SALAMPAK, D. 1999. Peningkatan Produktivitas Tanah Gambut yang Disawahkan dengan Pemberian Bahan Amelioran Tanah Mineral yang Berkadar Besi Tinggi. Disertasi Program Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor. 175 hlm.
- SILVOLA, J., J. VALIJOKI, and H. AALTONEN. 1985. Effect of draining and fertilization on soil respiration at three ameliorated peatland site. *Acta For. Fem*. 191: 1-32.
- SILVOLA, J., J. ALM, U. AKLHOLM, H. NYKANEN, and P.J. MARTIKAINEN. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture condition. *J. Ecol*. 84: 219-228.
- SUBIKSA, I G.M., SULAEMAN, dan I P.G.W. ADHI. 1998. Perbandingan pengaruh bahan amelioran untuk meningkatkan produktivitas lahan gambut. *Prosiding*

- Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor 10-12 Februari 1998. hlm 119-132.
- SUBIKSA, I G.M. 2012. Peran pugam dalam penanggulanagn fisik lahan dan mitigasi gas rumah kaca dalam sistem usahatani lahan gambut. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan. Bogor, 4 Mei 2012. hlm. 333-344.
- WÖSTEN, J.H.M., E. CLUMANS, S.E. PAGE, J.O. RIELEY, and S.H. LIMIN. 2012. Peat-water interrelationship in tropical peatland ecosystem in Southeast Asia. *Catena*. 72: 212-224.